

УДК 656.7.052:551.508.85.(043.3)

І.М. Браун
Ф.Й. Яновський, д-р техн. наук

АНАЛІЗ ДАНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ РАДІОЛОКАТОРІВ ДЛЯ БЕЗПЕЧНОЇ НАВІГАЦІЇ В УМОВАХ ГРАДУ

Інститут інформаційно-діагностичних систем НАУ, e-mail: braun@nau.edu.ua

Проведено аналіз експериментальних даних зондування хмар та опадів мікрохвильовими радіолокаторами і їх зіставлення з теоретичними моделями. Розглянуто сукупність ознак у вигляді поляриметричних змінних, котрі необхідні як апіорні дані для виконання синтезу алгоритмів обробки радіолокаційних сигналів з метою розв'язання різних прикладних задач, зокрема, розпізнавання граду для безпечної навігації та керування повітряним рухом.

Вступ

Останнім часом суттєво посилились вимоги до вірогідності і якості забезпечення метеорологічною інформацією екіпажів повітряних суден і служб керування повітряним рухом. Це пов'язано з прийняттям ІКАО та впровадженням нових концепцій керування повітряним рухом, таких, як Air Traffic Management (ATM) і Free Flight.

Згідно з концепцією Free Flight пілот отримуватиме більше свободи у виборі траєкторій польоту, повинен приймати остаточне рішення в надзвичайних і непередбачених ситуаціях і несе відповідальність за наслідки цього рішення.

Для реалізації цієї концепції екіпаж потребує більш детальної і достовірної інформації про можливі небезпеки на трасі руху, а також рекомендацій щодо запобігання цим небезпекам. Тому для прийняття обґрунтованих рішень при виборі траєкторій польоту і здійсненні маневрів поряд з розвитком бортових систем попередження зіткнень літаків і небезпечного наближення до землі необхідно розширення функціональних можливостей метеонавігаційної радіолокаційної системи як джерела метеорологічної інформації і підвищення вірогідності оперативних даних про небезпечні метеорологічні явища.

Упровадження на борту літака режиму виявлення зон граду за радіолокаційними даними є однією з задач першорядної важливості.

Постановка проблеми

Установлення кількісних зв'язків між інформаційними параметрами (ІП) відбитих сигналів і станом об'єкта, що відбиває ці сигнали, – одна із складних проблем дистанційного зондування.

Для визначення цих зв'язків у прямому експерименті, об'єкт, який зондується, повинен бути доступний для керування.

Однак у більшості випадків вирішення такої задачі сполучено з неподоланими труднощами.

Така ситуація виникає при зондуванні хмар і опадів за допомогою бортового або наземного радіолокатора.

Деякі важливі практичні результати можуть бути отримані, якщо поєднати аналіз експериментальних даних з математичним та імітаційним моделюванням [1; 2].

У даній роботі основний акцент зроблено на аналіз експериментальних даних, що зіставляються з розробленими раніше моделями.

Основні задачі

Основні задачі роботи впливають з того, що в світовій практиці дистанційного зондування атмосфери накопичена обмежена кількість натурних вимірювань в умовах граду. Ці вимірювання виконувалися різною апаратурою і в різних умовах, а головне, складно знайти необроблені дані. Тому необхідно було зробити відбір даних, що можуть бути використані для аналізу експериментальних досліджень, розробити методику аналізу та використати порівняння даних експерименту, теорії і моделювання.

Загальна характеристика вихідних даних

Основними джерелами вихідних експериментальних даних були:

– дослідження хмар і опадів, що були виконані протягом 1996–2001 рр. у Нідерландах у Міжнародному дослідницькому центрі при Делфтському університеті Delft University of Technology) в рамках договору про співробітництво між Національним авіаційним університетом і Делфтським університетом за допомогою поляриметричних радіолокаторів DARR і TARA, що працюють у S-діапазоні ($\lambda=9,05$ см);

– поляризаційні виміри в купчасто-дошових хмарах, що проводилися в 1989–1991 рр. радіолокаційним поляриметром X-діапазону ($\lambda=3,2$ см) Молдавською службою з активного впливу на гідрометеорологічні процеси;

– результати вимірів поляризаційних радіолокаційних відбитків, що були отримані в Росії в Центральній аерологічній обсерваторії у різний час, у т. ч. за допомогою бортового поляриметричного радіолокатора, розробленого спільно фахівцями Центральної аерологічної обсерваторії Національного авіаційного університету і Київського Науково-дослідного інституту «Буран», а також дані радіолокаційних вимірів у Флориді і Колорадо (США), що були виконані в 1998 і 2000 рр. за допомогою когерентно-імпульсного поляриметричного радіолокатора S-Pol.

Поляриметричні вимірювані змінні

Нехай s_{ri} – елементи коваріаційної матриці зворотного розсіювання, де індекси означають поляризацію падаючої хвилі і можуть набувати значення

$$r = h; v, \quad i = h; v.$$

Завдяки взаємності $s_{hv} = s_{vh}$, тому теоретично коваріаційна матриця зводиться до розмірності 3×3 .

З огляду на практичне значення лінійної ортогональної поляризації, обмежимося лише лінійним поляризаційним базисом, практично не втрачаючи спільності.

Основні поляриметричні вимірювані змінні можна виразити через s_{ri} :

– радіолокаційна відбиваність (РВ) при горизонтальній Z_H і вертикальній Z_V поляризаціях:

$$Z_H = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K|^2} \langle |s_{hh}|^2 \rangle;$$

$$Z_V = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K|^2} \langle |s_{vv}|^2 \rangle,$$

де λ – довжина хвилі; K – комплексний коефіцієнт заломлення речовини розсіювача:

$$|K|^2 = 0,93 \text{ для води; } |K|^2 = 0,19 \text{ для льоду;}$$

– диференціальна відбиваність (ДВ):

$$Z_{DR} = 10 \log \frac{|s_{hh}|^2}{|s_{vv}|^2},$$

– лінійне деполаризаційне відношення (ЛДВ):

$$L_{DRhv} = 10 \log \frac{|s_{hv}|^2}{|s_{vv}|^2} = L_{DRvh} = 10 \log \frac{|s_{vh}|^2}{|s_{vv}|^2} = L_{DR};$$

– кореляційний коефіцієнт (КК) при нульовому зсуві

$$\rho_{hv}(0) = \frac{\langle s_{vv} s_{hh}^* \rangle}{\sqrt{\langle |s_{hh}|^2 \rangle \langle |s_{vv}|^2 \rangle}}.$$

– диференціальна фаза (ДФ):

$$\phi_{DP} = \phi_H - \phi_V,$$

де ϕ_H , ϕ_V – фази відбитого сигналу при горизонтальній і вертикальній поляризаціях відповідно.

Оскільки різниця фаз залежить від дальності, на якій знаходяться розсіювачі, то доцільно використовувати питому диференціальну фазу (ПДФ):

$$K_{DP} = \frac{\phi_{DP}(R_1) - \phi_{DP}(R_2)}{2(R_2 - R_1)},$$

де R_1 , R_2 – дальності до двох розділних об'єктів ($R_2 > R_1$).

Експериментальна перевірка адекватності моделей

Для перевірки адекватності моделей [1; 2], за якими розраховувалися ДВ Z_{DR} і ЛДВ L_{DR} , використовувалися результати зондування дощу слабкої і помірної інтенсивності за допомогою радіолокаційної системи TARA [3].

При зміні кута нахилу антени і дальності, відбивані сигнали приходять від різних розділних об'єктів, що можуть мати різні поляризаційні властивості. Тому немає повної впевненості, що зміни викликані змінами кута нахилу антени, а не тим, що інші розсіювачі мають інші поляризаційні властивості. З цієї причини для обробки були обрані об'єкти, що мають найбільш однорідну структуру у великих обсягах простору – суцільні опади. Це дозволяє одержати залежність вимірюваних поляризаційних параметрів як функцій кута нахилу антени.

Алгоритм обробки даних, що являють собою доплерівські спектри, поєднує:

– оцінку відбиваності Z та поляризаційних характеристик Z_{DR} і L_{DR} при заданому значенні кута місця θ ;

– оцінку інтенсивності дощу і медіанного діаметра D_o крапель;

– розрахунок поляризаційних параметрів $Z_{DR}(\theta)$ і $L_{DR}(\theta)$ відповідно до розроблених моделей при значеннях θ і D_o , оціненим за даними експерименту;

– зіставлення обмірюваних і розрахованих величин Z_{DR} і L_{DR} .

Результати розрахунків зображені на рис. 1 суцільними кривими, а крапками позначені результати оцінок безпосередньо за даними радіолокаційного зондування при кутах θ , які дорівнюють 15; 30; 45; 90 град.

З рис. 1 можна побачити, що теорія не суперечить даним експерименту.

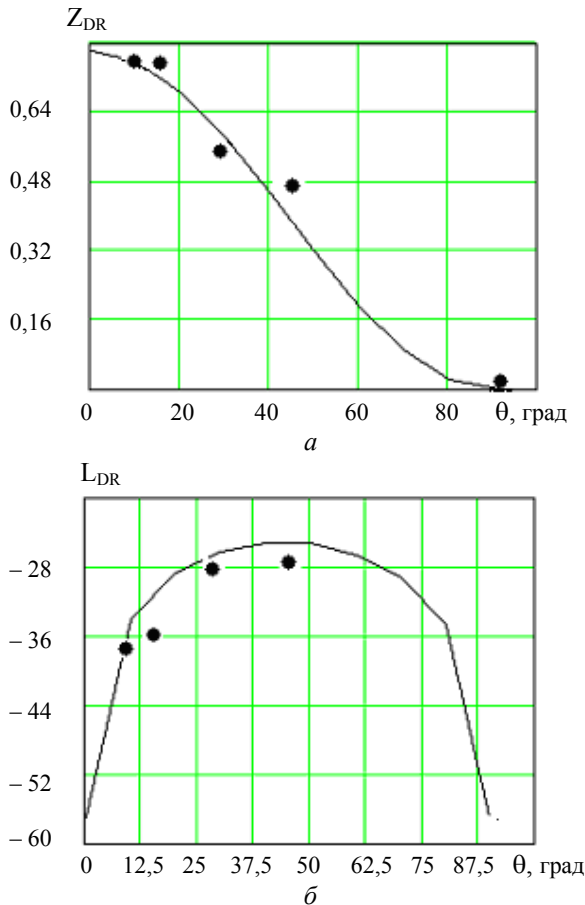


Рис. 1. Розраховані й виміряні значення ДВ (а) і ЛДВ (б)

Вимірювання одноканальним радіолокаційним поляриметром

У працях [4–6] подані горизонтальні та вертикальні профілі зондування рідких опадів, що проводилися за допомогою одноканального рухомого стробування. Спостерігалися стрибки ДВ під час електричних розрядів, що викликані зміною орієнтації несферичних поляризованих розсіювачів під дією сильного електричного поля.

Апроксимації спільного розподілу РВ та ЛДВ гауссовим розподілом показано на рис. 2.

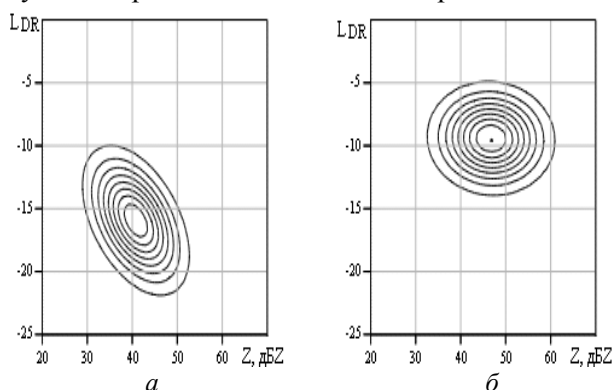


Рис. 2. Двовимірні розподіли у вигляді контурної діаграми:
 а – $p(Z, L_{DR})$ – дощ без граду; б – $p(Z, L_{DR})$ – град

Вимірювання двоканальним радіолокаційним поляриметром

Вихідні дані вимірювань, виконаних за допомогою двоканального поляриметра [7], являють собою роздрук матриць, що містять 32 елементи по горизонталі і 31 елемент по вертикалі. У припущенні, що поляризаційні інформаційні параметри характеризуються гладкими щільностями розподілу ймовірностей (ЩРІ), при аналізі даних застосований метод ядерних оцінок ЩРІ із використанням потенційних функцій [8]. Ядерні оцінки щільності спільного розподілу ДВ і ЛДВ для дощових градових хмар показано на рис. 3.

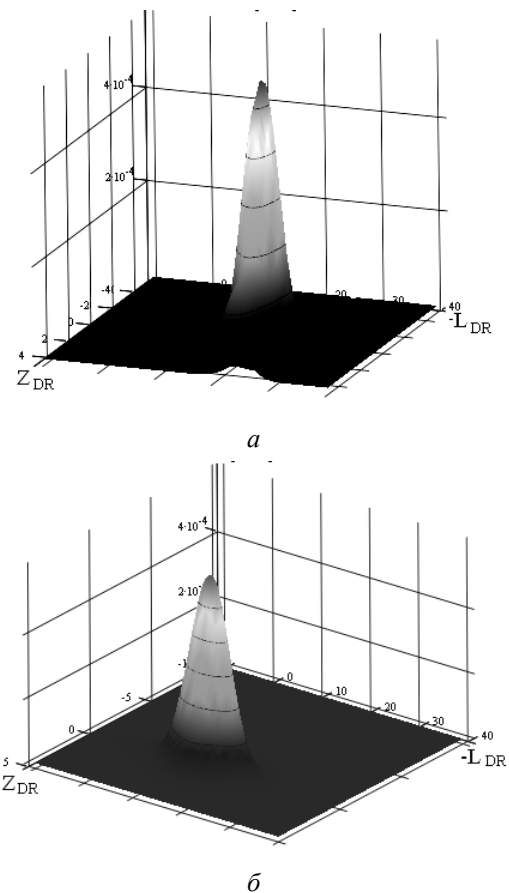


Рис. 3. Ядерні оцінки щільності спільного розподілу ДВ (а) і ЛДВ (б)

Застосування проекційних оцінок з гауссовими ядрами забезпечує одержання плавних оцінок ЩРІ поляризаційних характеристик навіть за малими вибірками.

Вимірювання когерентно-імпульсним радіолокатором

На відміну від РВ, ДВ і ЛДВ поляризаційний параметр ДФ ϕ_{DP} пов'язаний з особливостями поширення радіохвиль у середовищі.

У процесі розсіювання на гідрометеорах може виникати додатковий диференціальний фазовий

зсув φ_α , пов'язаний не з поширенням, а з розсіюванням. Звичайно він обумовлений розсіювачами великого діаметра.

Розмір φ_α вносить внесок у повну вимірювану ДФ. Тому вимірювані величини φ_{DP} будуть більше нуля, навіть якщо всі розсіювачі мають сферичну форму, але серед них присутні великі полідисперсні частинки.

У праці [9] указується, що φ_α не тільки впливає на φ_{DP} , але і знижує значення коефіцієнта взаємної кореляції $\rho_{hv}(0)$.

Дані вимірів ПДФ K_{DP} , КК $\rho_{hv}(0)$ та інших поляриметричних характеристик, отримані за допомогою радіолокатора S-Pol у вигляді каліброваних радіолокаційних іміджів [10], були використані для аналізу і зіставлення з отриманими раніше результатами.

Аналіз результатів

У випадку поляриметричного радіолокаційного зондування метеорологічних об'єктів характеристики випромінювання зворотного розсіювання відрізняються для горизонтально і вертикально поляризованих зондувальних імпульсів. Параметр ДВ не виходить з діапазону -2 – 5 дБ. При близькому до горизонтального зондування спостереження величин ДВ, що значно перевищують нуль дБ, свідчать про переважну присутність сплюснених гідрометеорів.

Переважає присутність сферичних гідрометеорів обумовлює близькі до нуля величини ДВ, а негативні обмірювані величини ДВ свідчать про відбивання від витягнутих гідрометеорів.

Величини ДВ, вимірювані в об'єкті, який складається із суміші різного типу гідрометеорів, виявляються зміщеними у бік форми тих гідрометеорів, що характеризуються більшою ДВ. Тому в суміші дощу і граду вимірювана ДВ виявляється ближчою до значення, яке було б у разі граду. Ця особливість ускладнює поділ між градом і сумішшю при використанні лише пари параметрів РВ і ДВ.

Істотні відмінності при радіолокації граду і дощу забезпечує параметр ЛДВ.

Результати експерименту показують навіть більш відмінності в значеннях ЛДВ між об'єктами з градом і без граду, ніж результати розрахунків. Це свідчить, що параметри моделей для граду були обрані з надмірною обережністю.

Об'єкти з градом характеризуються більшими значеннями ЛДВ, ніж дощ через неправильність форми і хаотичність орієнтації. Це забезпечує переваги ЛДВ як ІП.

Однак проблемою є вимірювання малих значень ЛДВ від слабого дощу.

Наявність великого граду супроводжується дуже високими значеннями РВ, близькими до нуля або негативними значеннями ДВ, а також значеннями КК, у середньому більш низькими, ніж для дощу.

Великий град може викликати значне ослаблення сигналу. У таких випадках величини ПДФ і КК, що спостерігаються, повинні використовуватися з обережністю.

У таблиці, складеній на основі виконаного аналізу даних з урахуванням результатів розрахунку і моделювання, зібрані відомості про характерні значення п'яти основних поляризаційних параметрів, що можуть забезпечити ефективне використання поляриметричного радіолокатора для класифікації за типами гідрометеорів.

**Величини поляриметричних ІП
для гідрометеорів різного типу**

Інформативні параметри	Тип гідрометеорів		
	Дощ	Град	Суміш
РВ, дБZ	25...60	48...70	48...70
ДВ, дБ	0,5...4,2	-2...0,5	-1,2...1,2
ЛДВ, дБ	-35...-15	-20...-5	-21...-8
КК	0,97...1	0,95...1	0,87...1
ПДФ, град/км	0...10	-1,5...1,5	0...10

Висновки

Поляриметричні вимірювані змінні можуть бути використані разом із РВ для розпізнавання типу гідрометеорів. Вимірювання поляризаційних параметрів істотно розширюють можливості радіолокаційних засобів при виявленні градових очагів і зон обледеніння літаків.

Отримані дані про особливості поляриметричних характеристик є необхідними і дуже важливими для розробки алгоритмів виявлення небезпечних для польотів зон. Вони можуть бути використані для розширення функціональних можливостей метеонавігаційних радіолокаторів, а також аеродромних метеорологічних систем спостереження для забезпечення керування повітряним рухом.

Список літератури

1. Yanovsky F.J. Phenomenological models of doppler-polarimetric microwave remote sensing of clouds and precipitation // IEEE IGARSS. – 2002. – Vol. 3. – P. 1905–1907.
2. Yanovsky F.J., Russchenberg H.W.J., Ligthart L.P. Doppler-polarimetric models of microwave remote sensing of rain // 11th conf. on microwave technique COMITE-01. – Pardubice, Czech Republic. – 2001. – P. 47–62.

3. Yanovsky F.J., Unal C.H.M., Russchenberg H.W.J., Ligthart L.P. Doppler-polarimetric radar observations of turbulence in rain // World Congr. "Aviation in the XXI century". – 2003. – Kyiv, Ukraine. – P. 5.8 – 5.14.
4. Кочин А.В. Определение размера капель дождя методом дифференциальной отражаемости // Тр. 7-го Всесоюз. совещ. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – С. 208–210.
5. Shupiatzky A.B., Yanovsky F.J. Use of polarization and statistical characteristics of radar signals in detecting areas in clouds dangerous for aircraft flight. Int. conf. on aviation meteorological systems. – Paris, France, 1991. – P. 347–352.
6. Диневич Л.А., Шупяцкий А.Б., Кочин А.В. Применение радиолокационного поляриметра для определения градоопасности облаков. – М.: Гидрометеиздат, 1981. – 8 с.
7. Диневич Л.А., Канитальчук И.П., Шупяцкий А.Б., Штигельман А.К. Определение микрофизических характеристик облаков и осадков радиолокатором с двойной поляризацией // Активные воздействия на атмосферные процессы в Молдавии. – Кишинев: Штиинца, 1989. – С. 5–18.
8. Yanovsky F.J., Sinitsyn R.B., Braun I.M. Recognition of hail areas with polarimetric radar by the Method of Potential Functions // IEEE IGARSS. – 2002. – Vol. 5. – P. 2835–2837.
9. Balakrishnan N. and Zrnic D.S. Use of polarization to characterize precipitation and discriminate large hail // J. Atmos. Sci. – 1990. – 47. – P. 1525–1540.
10. Яновский Ф.И., Браун И.М. Экспериментальные исследования поляризационных характеристик облаков и осадков // Сибир. поляризационный семинар СибПол–2004. Докл. – Сургут, Россия. – 2004. – С.80–87.

Стаття надійшла до редакції 05.03.05.

И.М. Браун, Ф.И. Яновский

Анализ данных экспериментальных исследований поляризационных параметров радиолокаторов для безопасной навигации в условиях града

Проведены анализ экспериментальных данных зондирования облаков и осадков микроволновыми радиолокаторами и их сопоставление с теоретическими моделями. Рассмотрена совокупность признаков в виде поляриметрических переменных, которые необходимы в качестве априорных данных для выполнения синтеза алгоритмов обработки радиолокационных сигналов с целью решения различных прикладных задач, в частности, распознавания града для безопасной навигации и управления воздушным движением.

I.M. Braun, F.I. Yanovsky

Radar polarization data analysis for safe navigation under the condition of hail zones

The paper is devoted to analysis of experimental sensing data of clouds and precipitation by microwave radars and their comparison with theoretical models. As a result, a features set of polarimetric variables, which are necessary as a priori data for synthesis of processing algorithms of radar signals, is formed with the purpose to solve various applied problems, in particular, hail recognition for flight safety and air traffic control.